

## ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.317.3

В.О. Бржезицький, Р.В. Вендичанський, Я.О. Гаран, О.М. Десятов

### ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАБІЛІТРОНІВ І РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЕТАЛОННИХ УСТАНОВОК ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

The problem of stabilitrans selecting for use in reference high-voltage installations of a direct current, calculation of a high voltage pulsations are observed at various modes of operation of such installations and definitions of methods of their amplitude decreasing. Problems of support of the stable power supplies of reference installation depending on characteristics of an alternating voltage source selection and the circuit design of this voltage transformation are analyzed. Researches of modes of the power supplies of reference installation over the operating voltage range from 1 to 180 kV are performed. It was found that the amplitude and character of voltage pulsations can have an effect on accuracy of scale high voltage transformation, and factor of pulsations  $\Delta p$  essentially depends on operating conditions of reference installation. The obtained results have shown that increasing of resistance value of the filter is almost proportional to the decreasing of pulsations amplitude. Provisions for pulsations amplitude decreasing and raise of demands to stability of separate elements of reference installations are offered.

**Keywords:** the standard of a high voltage of a direct current, the stabilitrans, voltage ripple, stability of the power supplies.

#### Вступ

Використання стабілітронів у низьковольтних електронних схемах є широко відомим. Низьковольтні напівпровідникові пристрої застосовуються в радіоапаратурі, а “високовольтні” і потужні стабілітрони – в силових комутуючих пристроях. Проте використання низьковольтних малопотужних стабілітронів у високовольтній техніці є відносно новим і мало вивченим.

Особливістю застосування низьковольтних малопотужних стабілітронів у високовольтній техніці є необхідність урахування впливу сильних електричних полів на роботу стабілітронів. Якщо для забезпечення нормованих для стабілітронів режимів у звичайних умовах підвищених напруг достатньо використати послідовно-паралельне з’єднання груп стабілітронів, то для запобігання впливу сильних електричних полів на їх роботу є необхідним відповідне екранування та просторове розміщення.

При використанні стабілітронів у низьковольтних джерелах живлення зазвичай застосовуються площинні кремнієві стабілітрони, виготовлені за особливою технологією. При включенні їх у зворотному напрямку і за певної напруги останні “пробиваються”, і далі, незважаючи на збільшення струму, напруга на них залишається практично незмінною. Завдяки цій властивості стабілітрони широко використовуються як самостійні стабілізуючі елементи, а також як джерела зразкових напруг у стабілізаторах на транзисторах. Для одержання

малих зразкових напруг стабілітрони включають у прямому напрямку [1].

Еталонні установки високої напруги змінного струму з подільниками напруги, розглянуті в [2], призначені для відтворення одиниці коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги змінного струму. Аналогічна установка еталона високої напруги постійного струму ДЕТУ 08-04-99 використовується в державній повірочній схемі для відповідних засобів вимірювань електричної напруги [3].

В еталонних установках високої напруги постійного струму використовується ланка з послідовно з’єднаних стабілітронів, яка виконує роль еталонного подільника напруги. Похибки та невизначеність такої еталонної установки мають спільні риси з похибками та невизначеністю еталона одиниці електричної напруги змінного струму, розглянутими в [4], проте мають також і певні особливості.

Забезпечення стабільного електроживлення еталонної установки високої напруги пов’язане як з вибором характеристик відповідного джерела живлення синусоїдальної напруги та схеми перетворення цієї напруги на напругу постійного струму, так і з вибором типу стабілітронів еталонної установки. Водночас на режими еталонної установки впливають характеристики елементів схеми випрямлення синусоїдального струму частоти 50 Гц (зокрема, пульсації напруги). Амплітуда і характер пульсацій напруги можуть значно впливати на точність масштабного перетворення високої напруги постійного струму в еталонній установці, тому

дослідження режимів живлення цих установок є актуальним.

### Постановка задачі

Метою статті є розгляд питань вибору стабілітронів, придатних для використання в еталонних установках високої напруги постійного струму, розрахунок пульсацій високої напруги за різних режимів роботи таких установок та визначення методів зменшення їх амплітуди.

### Вибір стабілітронів для еталонних установок високої напруги постійного струму

Використання стабілітронів для високовольтних установок, особливо еталонних [5], вимагає обґрунтованого підходу до їх вибору та застосування. Огляд стабілітронів дає змогу вибрати за характеристиками найбільш придатні до застосування в еталонних установках високої напруги постійного струму.

Існуючі напівпровідникові стабілітрони класифікуються за функціональним призначенням на: стабілітрони загального призначення, прецизійні, імпульсні [6].

Стабілітрони загального призначення [7] — це кремнієві, сплавні стабілітрони малої потужності, застосовувані для стабілізації напруги в певному діапазоні струмів стабілізації.

Стабілітрони прецизійні [7] — це кремнієві, дифузійно-сплавні стабілітрони малої потужності, призначені для стабілізації напруги в певному діапазоні струмів стабілізації з високими вимогами до стабільності напруги в діапазоні температур.

Стабілітрони імпульсні [7] — це кремнієві стабілітрони малої потужності, які призначені для стабілізації постійної та імпульсної напруги в діапазоні струмів стабілізації, а також для обмеження імпульсів напруги.

Проаналізувавши відомі дані стабілітронів, можна узагальнити, що існують стабілітрони з параметрами:  $U_{\text{ст}}$  від 1,5 до 180 В [6], струм стабілізації від 0,5 мА до 1,4 А [7]; температурний коефіцієнт напруги стабілізації  $\alpha$  від 0,0005 до 0,15 %/К [6]; диференціальний опір  $R_d$  від 0,6 до 980 Ом [7].

Особливу групу становлять прецизійні стабілітрони, що мають температурний коефіцієнт  $\alpha$  до 0,0005 %/К [6], тобто в сотні разів нижче, ніж у інших.

Вибір стабілітронів для високовольтних еталонних установок відбувається за основними критеріями:

*Напруга стабілізації*  $U_{\text{ст ном}}$  — номінальний

спад напруги на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні струму.

*Мінімальний струм стабілізації*  $I_{\text{ст min}}$  —

таке значення струму через стабілітрон, за якого виникає стійкий ефект стабілізації.

*Максимальний струм стабілізації*  $I_{\text{ст max}}$  —

найбільше значення струму через стабілітрон, за якого потужність, що розсіюється на стабілітроні, не перевищує допустимого значення.

*Диференціальний опір*  $R_d$  — відношення збільшення напруги на стабілітроні до збільшення струму в режимі стабілізації  $R_d = dU_{\text{ст}} / dI_{\text{ст}}$ .

Значення  $R_d$  характеризує ступінь стабільності напруги стабілізації при зміні струму.

*Потужність розсіювання*  $P$  — найбільша потужність, що виділяється в  $p$ - $n$ -переході, за якої ще не виникає теплового пошкодження стабілітрона.

*Температурний коефіцієнт напруги стабілізації*  $\alpha$  — відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури навколишнього середовища (виражається в %/К) за одного і того ж значення струму стабілізації.

Вибираючи стабілітрони для еталонних установок високої напруги постійного струму, варто враховувати, що в цих установках вони з'єднуються послідовно, при цьому їх кількість може досягати десятків тисяч одиниць.

Основні вимоги, які є визначальними при виборі типу стабілітронів для високовольтних еталонних установок, — такі:

- напруга стабілізації  $U_{\text{ст}} \sim 9$  В;
- струм стабілізації  $I_{\text{ст}} \sim 3\text{--}7$  мА;
- температурний коефіцієнт  $\alpha \sim \pm 0,002$  %/К;
- диференціальний опір  $R_d \sim 10\text{--}100$  Ом.

Порівнявши характеристики розглянутих вище стабілітронів, відзначаємо, що вказаним вимогам відповідають прецизійні стабілітрони типу Д818. Стабілітрони Д818Г, Д818Д і Д818Е мають практично однакові параметри, але, порівнюючи їх температурні коефіцієнти напруги стабілізації  $\alpha$ , можна відзначити, що вони становлять  $\pm 0,005$ ,  $\pm 0,002$  і  $\pm 0,001$  %/К [6] відповідно. Звідси, за цим показником, кращими є стабілітрони типу Д818Е.

Проте, враховуючи їх високу вартість, вибираємо тип стабілітронів Д818Д. Крім цього, необхідно приділити особливу увагу тому факту, що стабілітрони серії Д818 випускаються як в металевому, так і в скляному корпусі. З метою оцінки впливу електричного поля високої напруженості на напівпровідникову частину конструкції стабілітрона виконано моделювання двох типів стабілітронів Д818Д: у скляному та металевому корпусах в програмному пакеті скінченноелементного моделювання Comsol Multiphysics.

Для оцінювання умов впливу електричного поля на характеристики стабілітрона в скляному корпусі його вісесиметричну модель (рис. 1) розміщено вертикально в електричному полі двох екрануючих горизонтальних плоских електродів: заземленого та потенціального, відстань між якими становить 10 см, що відповідає реальній конструкції еталонної установки. На рис. 1 зображено активну частину моделі стабілітрона в скляному корпусі, яка відображає розміщення напівпровідникової частини стабілітрона (кристала) в його конструкції. Розміри по горизонтальній вісі вказані в міліметрах, по вертикальній — у метрах.

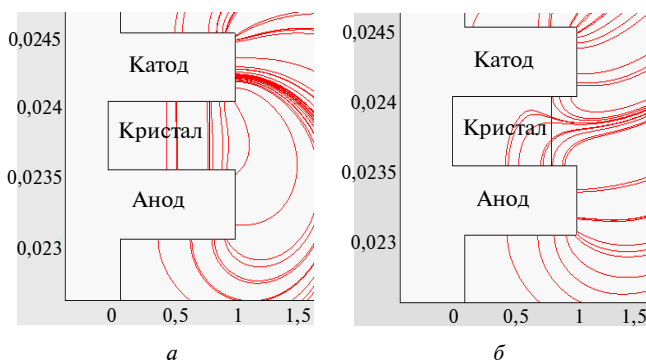


Рис. 1. Картина електричного поля в конструкції стабілітрона Д818Д зі скляним корпусом; потенціал на верхньому екрануючому електроді: а – 9 В; б – 10 кВ

Модель стабілітрона в металевому корпусі розміщена також вертикально в електричному полі екрануючих електродів. На рис. 2 зображено активну частину моделі стабілітрона в металевому корпусі, яка відповідає іншому розміщенню напівпровідникової частини стабілітрона. Розміри по горизонтальній і вертикальній осях вказані в метрах.

На катод в обох моделях поданий потенціал 9 В, аноди обох моделей мають нульовий потенціал. На верхній екрануючий електрод в обох моделях поданий потенціал, аналогічний

потенціалу катода (9 В), нижній екрануючий електрод, як і анод, має нульовий потенціал. З метою спрощення розрахунків картини електричного поля ізоляційні матеріали та кристали в обох моделях були замінені повітрям.

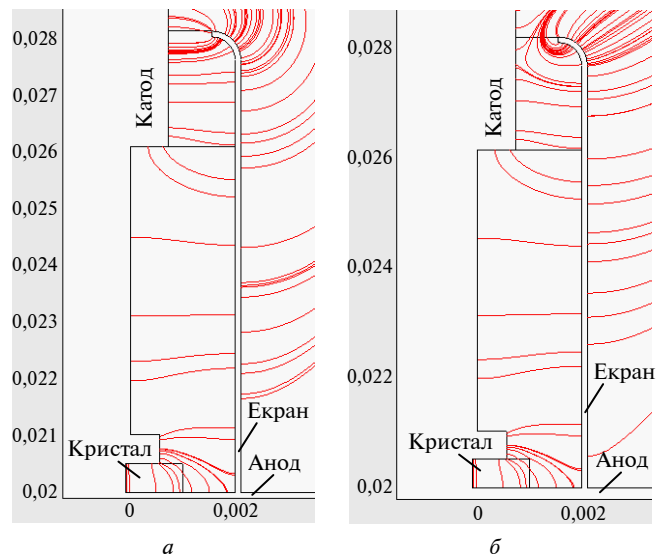


Рис. 2. Картина електричного поля в конструкції стабілітрона Д818Д з металевим корпусом; потенціал на верхньому екрануючому електроді: а – 9 В; б – 10 кВ

За розрахованою в програмному пакеті Comsol Multiphysics картиною електричного поля (рис. 1, а, рис. 2, а) в обох конструкціях знайдені потоки векторів електричного зсуву ( $D_{10}$  і  $D_{20}$  відповідно) крізь поверхні напівпровідникових частин стабілітронів, які “відкриті” впливу електричних полів.

Далі для моделі на рис. 1 потенціал верхнього робочого електрода був збільшений на 10 кВ. При цьому знайдено потік вектора електричного зсуву  $D_{11}$  крізь відповідну поверхню (див. картину електричного поля на рис. 1, б).

Значення зміни потоку вектора електричного зсуву, розраховане за формулою

$$\Delta D1 = \frac{D_{10} - D_{11}}{D_{10}} \cdot 100 \%,$$

становило  $\Delta D1 = 201,45 \%$ .

Для моделі на рис. 2 потенціал верхнього екрануючого електрода також був збільшений на 10 кВ. При цьому знайдений потік вектора електричного зсуву крізь відповідну поверхню становив  $D_{21}$  (див. картину електричного поля на рис. 2, б).

Аналогічно, зміну потоку вектора електричного зсуву було розраховано за формулою:

$$\Delta D2 = \frac{D2_0 - D2_1}{D2_0} \cdot 100 \%,$$

її значення становило  $\Delta D2 = 1,1 \cdot 10^{-5} \%$ .

Одержані результати розрахунків свідчать про неможливість використання стабілітронів без металевого екрануючого корпусу у висковольтних еталонних установках постійного струму.

Отже, за результатами проведених розрахунків, для еталонних установок високої напруги постійного струму вибираємо тип стабілітронів Д818Д з обов'язковим виконанням у металевому екрануючому корпусі.

### Розрахунок режимів джерела живлення еталонної установки високої напруги постійного струму

Еталонна установка високої напруги постійного струму 1–180 кВ призначена для зберігання і передачі одиниці напруги зразковим та робочим засобам вимірювань і розмірів коефіцієнта масштабного перетворення високих напруг. Сфера її застосування – це вимірювання і дослідження метрологічних характеристик обладнання, за допомогою якого проводяться випробування висковольтної ізоляції, апаратури та конструкцій [5].

На рис. 3 наведена схема заміщення еталонної установки високої напруги постійного струму, де:  $C_1 = 0,1$  мкФ,  $C_2 = C_3 = 0,072$  мкФ,  $R_1 = 1,78$  МОм, а усереднене значення напруги навантаження змінюється в діапазоні  $U_{\text{наб}} = 1\text{--}180$  кВ. Параметри елементів у цій схемі відповідають тим, що фактично застосовуються в еталонній установці ДЕТУ 08-04-99 в режимах напруг від 1 до 180 кВ.

На рис. 3 позначені:  $C_1$  – зарядний конденсатор;  $C_2, C_3$  – фільтрові конденсатори;  $R_{\text{ф}}$  – опір фільтра;  $VD_1, VD_2$  – висковольтні діоди;  $ST_1, \dots, ST_i, \dots, ST_n$  – стабілітрони типу Д818Д; ПН – омичний подільник напруги.

Стабілітрони ST еталонної установки визначають стабілізований струм  $I_{\text{ст}} = 5$  мА для 27 значень вхідних номінальних напруг на навантаженні  $U_{\text{наб}}$  згідно з таблицею. Подільник напруги ПН має чотири значення вхідних номінальних напруг  $U_{\text{вх.ном.ПН}}$ : 180, 90, 60, 30 кВ, для яких струм подільника напруги покладається рівним  $I_{\text{ПН}} = 2,5$  мА. Для інших 23 вхід-

них напруг подільника напруги  $U_{\text{наб}}$  його струм зменшується пропорційно вхідній напрузі за формулою

$$I_{\text{ПН}} = \frac{2,5 \cdot U_{\text{наб}}}{U_{\text{вх.ном.ПН}}} (\text{мА}).$$

За одержаними для кожної з 27 номінальних вхідних напруг на навантаженні значеннями струмів ланки стабілітронів  $I_{\text{ст}}$  і подільника напруги  $I_{\text{ПН}}$  обчислюються сумарний струм навантаження  $I_{\text{наб}}$  та опір навантаження  $R_{\text{наб}}$ , який у подальшому використовується для розрахунків.

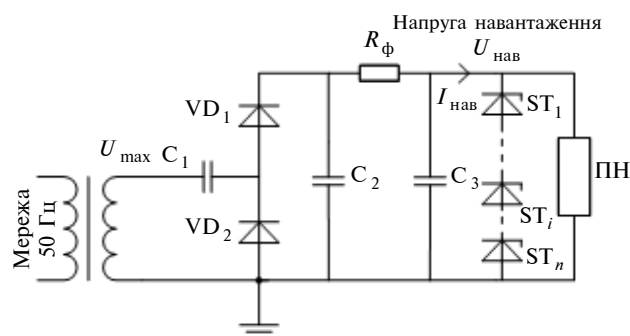


Рис. 3. Схема заміщення еталонної установки високої напруги постійного струму

Для розрахунку джерела живлення еталонної установки високої напруги постійного струму виконуємо такі дії.

Моделюємо схему заміщення еталонної установки високої напруги постійного струму з вихідними параметрами в програмі Multisim, за допомогою якої будуть здійснені розрахунки.

Визначаємо згідно з таблицею середній опір навантаження  $R_{\text{наб}}$  для кожного режиму напруги  $U_{\text{наб}}$  в діапазоні від 1 до 180 кВ.

За допомогою програми Multisim визначаємо амплітудну напругу джерела живлення  $U_{\text{max}}$  частоти 50 Гц для кожного режиму навантаження.

За відомими параметрами визначаємо графіки пульсацій для кожного режиму напруги  $U_{\text{наб}}$  у діапазоні від 1 до 180 кВ.

На рис. 4 наведено графік пульсацій у режимі 1 кВ висковольтного джерела живлення еталонної установки високої напруги постійного струму.

На рис. 5 наведено графік пульсацій у режимі 180 кВ висковольтного джерела живлення еталонної установки.

Таблиця. Розрахункові значення струмів і опору навантаження для режимів електроживлення еталонної установки

$U_{\text{нав}}, \text{В}$	$I_{\text{ст}}, \text{А}$	$I_{\text{пн}}, \text{А}$	$I_{\text{нав}}, \text{А}$	$R_{\text{нав}}, \text{Ом}$
180000	0,005	0,0025	0,0075	24000000
170000	0,005	0,0023611	0,0073611	23094340
160000	0,005	0,0022222	0,0072222	22153846
150000	0,005	0,0020833	0,0070833	21176471
140000	0,005	0,0019444	0,0069444	20160000
130000	0,005	0,0018056	0,0068056	19102041
120000	0,005	0,0016667	0,0066667	18000000
110000	0,005	0,0015278	0,0065278	16851064
100000	0,005	0,0013889	0,0063889	15652174
90000	0,005	0,0025	0,0075	12000000
80000	0,005	0,0022222	0,0072222	11076923
70000	0,005	0,0019444	0,0069444	10080000
60000	0,005	0,0025	0,0075	8000000
50000	0,005	0,0020833	0,0070833	7058823,5
40000	0,005	0,0016667	0,0066667	6000000
30000	0,005	0,0025	0,0075	4000000
20000	0,005	0,0016667	0,0066667	3000000
10000	0,005	0,0008333	0,0058333	1714285,7
9000	0,005	0,00075	0,00575	1565217,4
8000	0,005	0,0006667	0,0056667	1411764,7
7000	0,005	0,0005833	0,0055833	1253731,3
6000	0,005	0,0005	0,0055	1090909,1
5000	0,005	0,0004167	0,0054167	923076,92
4000	0,005	0,0003333	0,0053333	750000
3000	0,005	0,00025	0,00525	571428,57
2000	0,005	0,0001667	0,0051667	387096,77
1000	0,005	$8,333 \cdot 10^{-05}$	0,0050833	196721,31

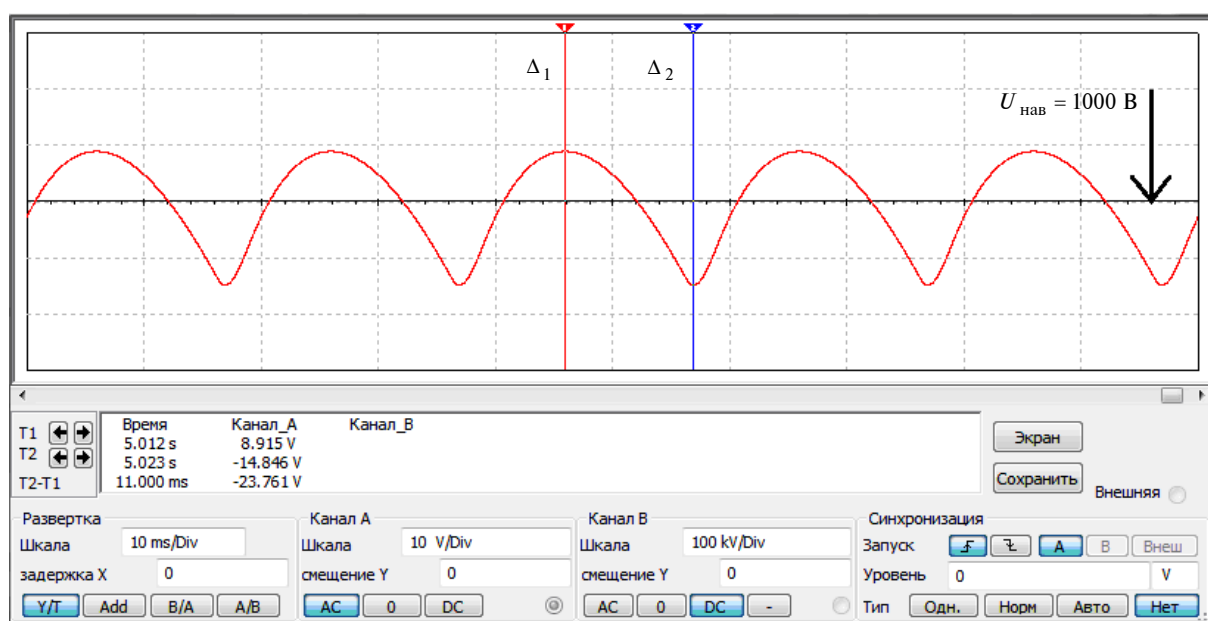


Рис. 4. Графік пульсацій у режимі напруги навантаження 1 кВ високовольтного джерела живлення еталонної установки

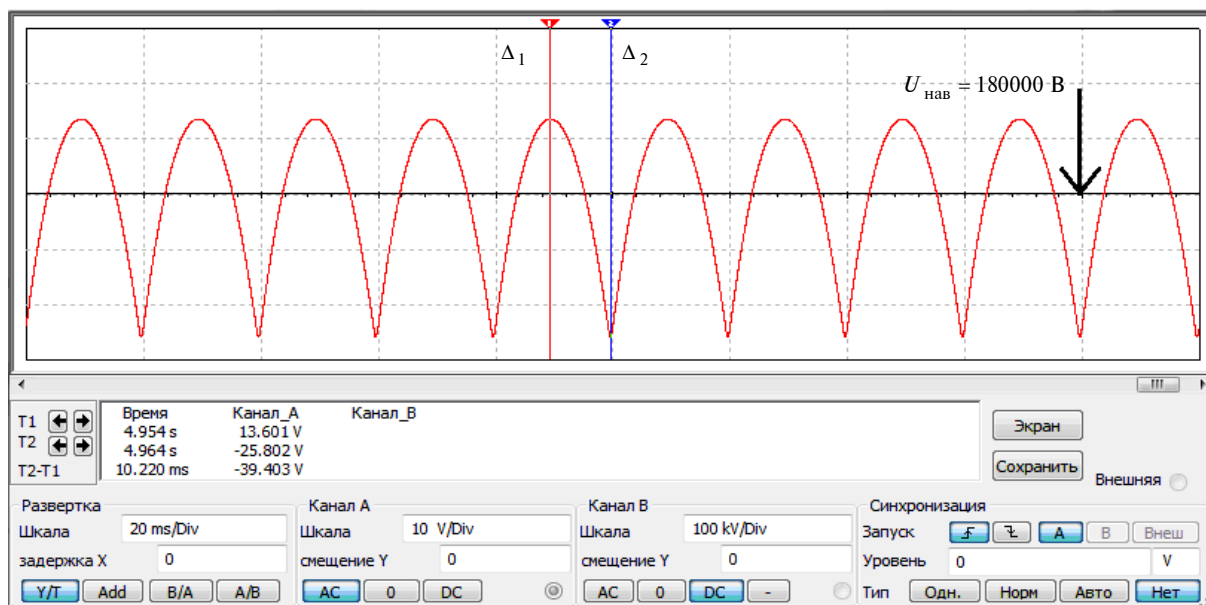


Рис. 5. Графік пульсацій у режимі напруги навантаження 180 кВ високовольтного джерела живлення еталонної установки

За наведеною вище методикою проводимо розрахунок для граничних режимів напруги навантаження 1 та 180 кВ й отримуємо такі результати (за значення активного опору фільтра  $R_{\phi} = 1,78$  МОм):

$$R_{\text{нав}(1)} = 0,197 \text{ МОм}; R_{\text{нав}(180)} = 24 \text{ МОм};$$

$$I_{\text{нав}(1)} = 5,083 \text{ мА}; I_{\text{нав}(180)} = 7,5 \text{ мА};$$

$$U_{\text{max}(1)} = 5,848 \text{ кВ}; U_{\text{max}(180)} = 98,362 \text{ кВ};$$

$$\Delta_{1(1)} = 8,915 \text{ В}; \Delta_{1(180)} = 13,601 \text{ В};$$

$$\Delta_{2(1)} = -14,846 \text{ В}; \Delta_{2(180)} = -25,802 \text{ В}.$$

Визначимо коефіцієнт пульсацій  $\Delta_n$  (у відсотках) у режимах 1 і 180 кВ за формулою

$$\Delta_n = \left( \frac{\Delta_a}{U_{\text{нав}}} \right) \cdot 100 \%,$$

де  $\Delta_a = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2}$  ( $\Delta_1, \Delta_2$  – позитивне та негативне значення амплітуди пульсацій).

За одержаними результатами маємо:

$$\Delta_{a(1)} = 11,8805 \text{ В};$$

$$\Delta_{n(1)} = 1,18805 \%;$$

$$\Delta_{a(180)} = 19,7015 \text{ В};$$

$$\Delta_{n(180)} = 0,01095 \%.$$

За проведеними розрахунками виконано аналіз впливу значення  $R_{\phi}$  на коефіцієнт пульсацій напруги. За значення опору  $R_{\phi}$  поклада-

лися 1,78; 3,56 і 7,12 МОм. На графіках рис. 6 можна побачити, що коефіцієнт пульсацій має практично обернено пропорційну залежність від величини опору фільтра (граничні значення зменшуються практично вдвічі зі збільшенням вдвічі опору фільтра).

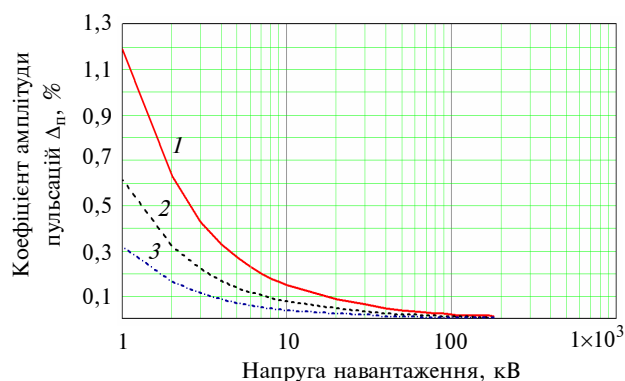


Рис. 6. Залежності коефіцієнта амплітуди пульсацій напруги в діапазоні 1–180 кВ для значень  $R_{\phi}$ : 1 – 1,78 МОм, 2 – 3,56 МОм, 3 – 7,12 МОм

Однак збільшення опору фільтра водночас підвищує вимоги до його стабільності, а також вимагає підвищення напруги джерела живлення.

Якщо підвищення напруги джерела живлення в певних межах є не досить складною задачею, виконання опору фільтра стабільним і змінюваним викликає істотні труднощі. Виконання такого опору з низьковольтних стабілітронів, аналогічно до конструкції високовольт-



ної частини еталонної установки, може спростити цю задачу.

Залежність розрахованої амплітудної напруги  $U_{\max}$  джерела живлення від опору фільтра є практично лінійною. Однак для режиму еталонної установки постійного струму 1 кВ, при збільшенні опору фільтра в 5 разів, напруга джерела живлення має збільшитись майже у 4,5 разу, а аналогічні зміни опору фільтра для режиму еталонної установки постійного струму 180 кВ вимагають підвищення напруги джерела живлення лише в 1,3 разу.

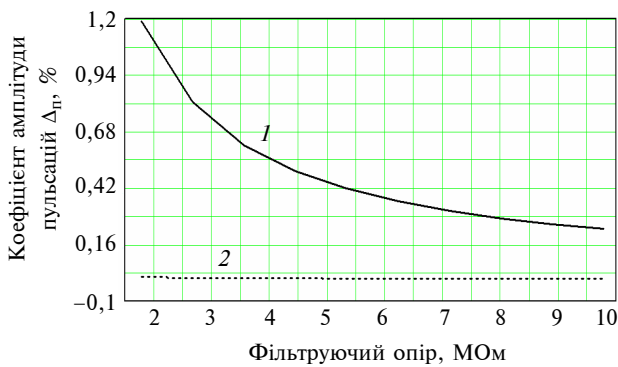


Рис. 7. Залежності коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_p$  на навантаженні від опору фільтра  $R_f$  для напруги навантаження постійного струму в режимах: 1 – 1 кВ, 2 – 180 кВ

Графік залежностей коефіцієнта амплітуди пульсацій від опору фільтра для граничних робочих напруг еталонної установки 1 та 180 кВ наведений на рис. 7.

## Висновки

Вибір низьковольтних стабілітронів для еталонних установок високої напруги постійного струму необхідно здійснювати як з урахуванням комплексу їх основних характеристик: напруги стабілізації, мінімального та максимального струмів стабілізації, диференціального опору, температурного коефіцієнта напруги стабілізації, так і за наявності екранування їх напівпровідникової частини від дії сильних електричних полів.

У результаті розрахунку схеми заміщення еталонної установки високої напруги постійного струму можна зазначити, що в режимі робочої напруги 1 кВ амплітуда пульсації напруги фактично становить 1,2 % (за проведеними розрахунками – 1,18805 %), а в режимі 180 кВ – 0,01095 %. Коефіцієнт пульсацій  $\Delta_p$  істотно залежить від робочого режиму еталонної установки високої напруги постійного струму.

При збільшенні значення опору фільтра відбувається практично обернено пропорційне зменшення амплітуди пульсацій, але це вимагає збільшення амплітуди напруги джерела живлення та підвищення вимог до стабільності опору фільтра.

Подальші дослідження режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму повинні враховувати допустимі значення пульсацій і стабільність елементів їх схем в умовах дії сильних електричних полів.

1. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы. – 6-е изд., доп. и испр. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – С. 410–446.
2. Іващенко М.М., Єрмолаєв В.А. Аналіз існуючих еталонів електричної напруги змінного струму // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – Вип. 4. – С. 104–106.
3. ДСТУ 3863–99. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної напруги постійного струму в діапазоні від 1 до 800 кВ. – К.: Держстандарт України, 1999.
4. Туз Ю.М., Добролюбова М.В., Артюхова Ю.В. Похибки та невизначеність еталону одиниці електричної

напруги від 0,001 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц // Системи обробки інформації. – 2009. – Вип. 5. – С. 112–115.

5. Метрология, стандартизация и сертификация в энергетике / С.А. Зайцева, А.Н. Толстой и др. – М.: ИЦ “Академия”, 2009. – С. 16–75.
6. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник / А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков и др.; под ред. А.В. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 264–394.
7. Электротехнический справочник / Под ред. И.И. Алиева. – М.: ИП РадиоСофт, 2010. – С. 173–190.